FACTSHEET
ISSN 1198-712X ©Queen's Printer for Ontario

Agdex#: 736/202 Publication Date: 06/98
Order#: 98-031 Last Reviewed: 06/98

Title:Tunnel Forced-Air Coolers for Fresh Fruits & Vegetables

Division: Agriculture and Rural
History: Original Factsheet
Written by: H.W. Fraser

Table of Contents

1. Introduction
2. Why Cool As Soon As Possible After Harvest?
3. How is Forced-Air Cooling Accomplished?
4. 7/8 Cooling Times
5. What Products Can Be Forced-Air Cooled?
6. What Are Forced-Air Cooler Components?
7. 10 Steps to Designing a Forced-Air Cooler
8. Case Study
9. Other Considerations
10. References
11. For more information...

Introduction

This Factsheet describes how to design, build, and manage a commercial-size tunnel forced-air cooler for two to six pallets of fresh fruits and vegetables at one time. Forced-air coolers are commonly used in major fresh fruit and vegetable growing areas. Figures 1 and 2 show a large forced-air cooler being used to cool stone fruit in a California packing shed. Some crops need to be cooled more quickly after harvest than others, so the design is important to ensure that the airflow per unit weight of product is suited to the crop needs. The principles described in this Factsheet can be used to help design smaller or larger systems as required. Figure 3 shows a schematic of a forced-air cooler.

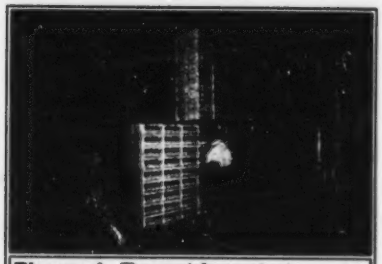

Figure 1: Tunnel forced-air cooler for two-layers of pallets of stone fruit at one time in a california packing shed. The tunnel is under the black tarp between two rows of pallets.

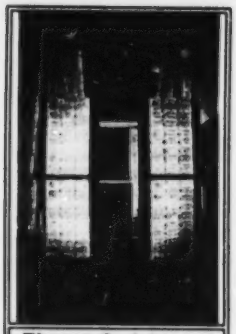

Figure 2: A tunnel is formed by pallets of produce placed in pairs against a duct with a fan inside it. A tarp is pulled over the tunnel to force air to travel through the container sides, down the tunnel and to the fan.

| Top of Page |

Why Cool As Soon As Possible After Harvest?

All fresh horticultural crops are living organisms, even after harvest, and they must remain alive and healthy until they are either processed or consumed (Fraser, 1991). The energy needed to carry on living comes from the food reserves in the product itself. The process by which these reserves are converted into energy is called *respiration*. Heat energy is released during respiration, but the rate varies depending on the type and variety of product, the level of maturity, the amount of injuries, and the product *temperature*.

Produce temperature has the greatest influence on respiratory activity. Rapid, uniform cooling as soon as possible after harvest to remove the *field heat*, is critical in lowering the respiration rate. This reduces the rate of deterioration, and helps provide a longer shelf-life. A rule of thumb is that a *one-hour delay in cooling reduces a product's shelf-life by one day*. This is not true for all crops, but is true especially for very highly perishable crops during hot weather.

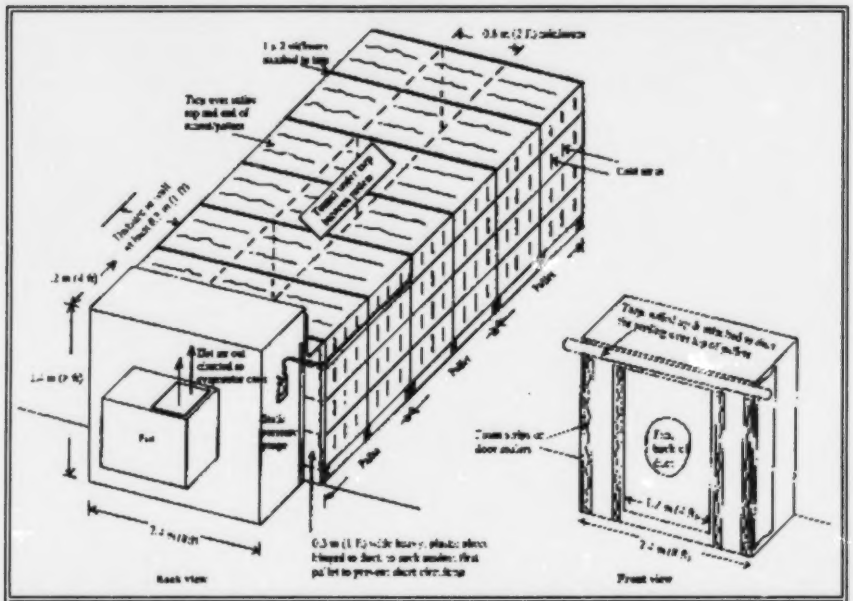

Figure 3: Schematic of the back and front of a tunnel forced-air cooler for fresh produce in containers on pallets.

Lowering the temperature also reduces the rate of ethylene production, moisture loss, spread of micro-organisms, and deterioration from injuries.

| Top of Page |

How is Forced-Air Cooling Accomplished?

Forced-air cooling is just one method of quickly removing field heat from freshly picked produce. Most fresh fruits and vegetables can be forced-air cooled. High capacity fans are used to pull refrigerated air through the produce. Rapid and uniform cooling results, from the forced-convective contact of the high-speed, refrigerated air with the warm produce. This is different from room cooling, where produce is simply placed in a cold storage room and cools slowly and non-uniformly, mainly through conduction and the natural convective contact with refrigerated air.

Pulling air, rather than *blowing* it through, is preferable since it is easier to minimize air short-circuiting and it results in more uniform cooling. Short-circuiting occurs if refrigerated air flows directly to the fan instead of going through the produce mass. Air will not flow as uniformly if it is pushed as it will if it is pulled through the produce. With proper container design and orientation, produce can be rapidly and uniformly cooled in baskets, boxes, bins, or bags. Forced-air cooling simply does a better job with the refrigerated air in the cold storage.

Although more costly, it is better to provide a dedicated forced-air cooling room, then move the produce to a longer term storage. Most cold storages used for forced-air cooling will rise in temperature after each fresh batch of warmer produce is added. If this temperature rise is great because of an undersized refrigeration system, cold produce already in the room would sweat and increase in temperature. Both situations are unacceptable. A good compromise is to form a forced-air cooling area by partitioning part of the storage using a tarp suspended from the ceiling. This helps reduce temperature fluctuations, but should be considered as a temporary measure.

| Top of Page |

7/8 Cooling Times

All fruits and vegetables cool quickly at first, then more slowly over time. Factors that affect the rate of forced-air cooling include:

- density of produce in the container (the less dense the produce pile, the faster is cooling)
- container type, orientation, and venting characteristics (if air passes uniformly and evenly by the produce, cooling is faster)
- volume to surface area of produce; the lower the ratio, the faster is cooling (cherries cool quicker than melons)
- travel distance of the cooling air (the shorter the distance, the faster is the cooling of the overall pile)
- airflow capacity (the higher the airflow, the faster is cooling).

The relative humidity of the cooling air has little effect on moisture loss, if it is above 85% and the cooling period is under 1 to 2 hours.

Regardless of the temperature of the cooling air or the starting temperature of the produce, the shape of the cooling curve remains the same, providing all the other factors listed above are kept constant. Only the rate of cooling changes.

The *7/8 cooling time* is a standard industry term that describes the time to remove seven-eighths (87.5%) of the temperature difference between the starting produce temperature and the temperature of the cooling medium (refrigerated air, in the case of forced-air cooling). It is a convenient method of indicating when produce has come as close as practical to the temperature of the cooling medium. Forced-air cooling should start as soon as practical after harvest, preferably within one hour. Don't let produce accumulate before putting it on the forced-air cooler, otherwise it will lose quality and shelf-life. The *7/8 cooling time* is measured from the time the produce is first placed on the forced-air cooler. See Figure 4.

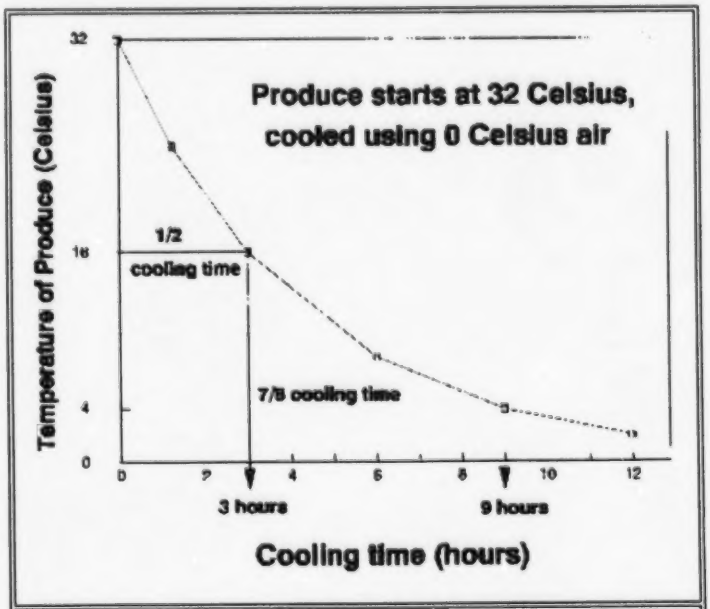

Figure 4: Typical time-temperature relationship for produce being cooled.

For example, if a 32°C peach cooled using 0°C air reaches 4°C in 9 hours, the 7/8

cooling time is 9 hours. That is, a 28°C temperature drop out of 32°C difference between the produce and air. The *7/8 cooling time* is, theoretically, three times as long as the *1/2 cooling time*. So, the same peach that took 9 hours to cool to 4°C above, would take only 3 hours to reach 16°C, the temperature at the *1/2 cooling time*, if everything else remained the same. In practice, the *7/8 cooling time* is usually different than three times the *1/2 cooling time* because conditions rarely remain exactly the same over the forced-air cooling period.

Sometimes one can estimate when a product will be *7/8 cool* by knowing other cooling times. Table 1 lists some other relationships.

Table 1: Relationships to 7/8 cooling times

If you know this cooling time...	**...then multiply by about the following to estimate the *7/8 cooling time***
1/4 cool time	7.5
3/8 cool time	4.5
1/2 cool time	3.0
3/4 cool time	1.5

For some crops, it might not be necessary to operate the forced-air cooler at temperatures as low as the optimum holding temperature for the produce. For instance, some produce might be forced-air cooled to 5°C, then slowly room-cooled in an adjacent holding room. This compromise could eliminate the need to have a refrigeration defrosting system in the forced-air cooling room.

| Top of Page |

What Products Can Be Forced-Air Cooled?

Most produce can be forced-air cooled, but the *7/8 cooling time* should be shorter for some produce that have special needs:

- have high respiration rates at harvest
- lose moisture easily (berries/leaf vegetables)
- are quite mature such as tree ripened peaches
- are shipped to distant markets.

Table 2 lists produce requiring quick cooling and suggested *7/8 cooling times* and airflows.

Table 2: Relative perishability of fresh fruits and vegetables and recommended 7/8 cooling times and airflows

Relative Perishability of Crops	Crop	7/8 Cool Time (hr)	[b]Airflow L/s/kg *(CFM/lb)*
Very High	[a]Asparagus, [a]broccoli, [a]leaf lettuce, [a]spinach, [a]sweet corn, mushrooms	0.75–1.5	6–2 (6–2)
High	Blueberries, raspberries, strawberries, sweet cherries, cauliflower, snap beans, head lettuce	1–2.5	4–1.25 (*4–1.25*)
Moderate	Apples (early), cabbage (early), cantaloupes, [a]celery, peaches, plums, peppers, summer squash	2–6	1.5–0.5 (*1.5–0.5*)

[a]Sprinkling water on the produce, or misting the cooling air before it enters the produce containers could be beneficial.
[b]Higher airflows are shown first to correspond with faster 7/8 cool times.

Crops With Very High Perishability

These crops all have very high respiration rates at harvest temperatures, and lose moisture rapidly after harvest. They *must* be rapidly cooled as soon as practical after harvest, or they will have little or no shelf-life. Some of these crops are more traditionally hydro-cooled, iced, or vacuum-cooled. However, all of them can be forced-air cooled, providing cooling is done quickly with high airflow rates and high relative humidity air to reduce the danger of drying them out. It is recommended that airflow rates of at least 2 to 6 L/s/kg of produce (*2 to 6 CFM/lb*) be used, attempting to have *7/8 cooling times* of no more than 45–90 minutes. These products must be monitored for signs of drying out. Sprinkling water on them before forced-air cooling (except mushrooms) might be helpful. Do not run the forced-air cooler any longer than necessary.

Crops With High Perishability

These crops have high respiration rates at harvest temperatures, and/or lose moisture rapidly, but it is not as critical to cool these products as rapidly as the ones listed previously. Experience has shown growers that these products *should* be forced-air cooled as quickly as practical after harvest. Watch for signs of the products drying out. Airflow rates of at least 1 to 3 L/s/kg of product *(1 to 3 CFM/lb)* should be used, with *7/8 cooling times* of no more than 1 to 3 hours.

Snap beans should only be cooled to about 4°C to 7°C *(40°F to 45°F)*, depending on the cultivar. Otherwise, they are susceptible to chilling injury. Avoid forced-air cooling them with refrigerated air below 4°C. Try to cool snap beans in less than 3 hours if possible. Snap beans are often washed after harvest, so a side-benefit of forced-air cooling is the drying effect of the airflow.

Crops With Moderate Perishability

Although these crops are less perishable than those already listed, it is still *recommended* that these crops be rapidly cooled as soon as practical after harvest. Their shelf-life will be improved. Airflow rates of at least 0.5 to 1.5 L/s/kg of produce *(0.5 to 1.5 CFM/lb)* and *7/8 cooling times* of no more than 3 to 6 hours are suggested.

Cantaloupes and summer squash are sensitive to chilling injury, so avoid forced-air cooling them with very cold refrigerated air. Cantaloupes should be cooled to about 2°C to 5°C *(34°F to 41°F)*, while summer squash should be cooled to about 7°C to 10°C *(45°F to 50°F)*.

| Top of Page |

What Are Forced-Air Cooler Components?

There are four components to a forced-air cooler:

- fan and duct system
- foam/tarp/plastic to prevent short-circuiting
- refrigeration system
- monitoring equipment.

Fan And Duct System

The fan powers the forced-air cooling system. Its airflow is measured in litres of air per second, L/s, *(cubic feet of air per minute or CFM)* based on its type (axial or centrifugal); its design (blade type and orientation); the difficulty in pulling the air through the produce (static pressure); the motor size (horsepower or Watts); and the revolutions per minute (RPM) of the fan blades.

Fans should be selected based on the airflow they produce at a given *static pressure* between the inlet and outlet of the fan. For most forced-air cooling systems, static pressures range from about 15 mm to 25 mm *(0.6–1.0 inches)* of water gauge. Both centrifugal (squirrel-cage or furnace-type) and axial-flow (propeller) fans can be used for forced-air cooling. Many forced-air coolers in Canada use centrifugal fans because of the availability of used equipment, and because they are quieter to work around. See Figure 5.

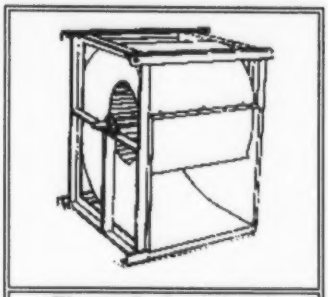

Figure 5: Centrifugal, squirrel-cage, or furnace-type fan often used for forced-air cooling.

Many growers find used centrifugal fans for their forced-air coolers, but it is difficult to establish the airflow rates for them. However, for *planning purposes only*, use Table 3 to help *estimate* the capacity of these fans.

Table 3: Approximate airflow ranges in L/s *(CFM)* of centrifugal fans (standard RPM drive range; one-way entry)

Motor size kW *(hp)*	**Approximate airflow, L/s (CFM) at the indicated static pressure**	
-	12 mm *(0.5 in.)*	25 mm *(1 in.)*
0.37 *(.5)*	1125–1225 *(2400–2600)*	–
0.75 *(1)*	1700–2450 (3600–5200)	1275–1500 *(2700–3200)*
1.1 *(1.5)*	2025–3075 *(4300–6525)*	1650–2275 *(3500–4800)*
1.5 *(2)*	2175–3550 *(4600–7525)*	1925–2825 *(4100–6000)*
2.25 *(3)*	2500–4250 *(5300–9000)*	2300–3575 *(4900–7600)*
3.75 *(5)*	3250–5200 *(6900–11000)*	3075–4750 *(6500–10000)*

Predicting the static pressure a forced-air cooling fan must operate against is difficult. It is affected by the airflow, amount of air entry area on container sides, vent alignment, distance the air must travel through the produce, density of the produce in the containers, and any ducting restrictions for the air. For most systems, fans should be selected based on a maximum static pressure of 25 mm *(1 in.)* water gauge.

There are many fan types and models. Smaller centrifugal fans need larger motors running at higher RPM, to obtain the same airflow as larger centrifugal fans. In general, larger fans with smaller motors are more efficient. Choose them to keep operating costs, noise, wear, and heat loads on the refrigeration system to a minimum. This allows flexibility to install a larger motor in future to provide higher airflow rates if needed.

Any air supply areas (outside of pallets) or air return (tunnel) areas should be designed to keep airspeeds under about 5 m/s *(1000 ft/min)*. This means providing at least 1 m^2 of cross-section for every 5000 L/s of airflow *(1 ft^2/1000 CFM)*. Smaller openings will restrict airflows, make the fan work harder, cause air to short-circuit near the fan, and cause uneven cooling.

To determine the minimum air supply area sizes and cross-sectional dimensions of the tunnel, suppose a forced-air cooling system is designed to cool 2250 kg *(4950 lbs)* of produce on six pallets, with an airflow of 4500 L/s, or 2 L/s per kg *(9530 CFM or 1.9 CFM/lb)*. See Figure 3. The pallets are 1.2 m *(4 ft)* wide and 1.5 m high *(5 ft)*. The equation for airflow is:

$$Q = A \times V \qquad or \qquad A = Q \div V$$

where Q is the airflow rate, L/s *(CFM)*
A is the cross-sectional area perpendicular to the airflow, m^2 *(ft^2)*
V is air velocity, m/s *(ft/min)*

The airflow is 4500 L/s (or 4.5 m^3/s), so all cross-sectional areas should be a minimum of:

$A = 4.5\ m^3/s \div 5\ m/s = 0.9\ m^2$
($A = 9530\ CFM \div 1000\ ft/min = 9.5\ ft^2$)

So, if the pallets are 1.5 m high *(5 ft)*, the tunnel should be at least:

$W = 0.9\ m^2 \div 1.5\ m = 0.6$ m wide
($W = 9.5\ ft^2 \div 5\ ft = 1.9$ ft wide)

For practical reasons, the tunnel should not be less than 0.6 m *(2 ft)* in width.

The cold air supply gap between the outside of the pallets and a wall or pallets on another adjacent forced-air cooler, must also be wide enough to allow cold air to enter easily. For practical reasons, this gap should be at *least* 0.3 m *(1 ft)*, or more so that someone can walk down the gap to check things out. Unless airflows are extremely high, this width is plenty wide enough to allow air to flow freely into the pallet sides.

For most applications minimum dimensions should be:

- tunnels; 0.6–1.2 m wide *(2–4 ft)*
- gaps to walls; 0.3–0.6 m wide *(1–2 ft)*
- gaps to adjacent units; 0.6–1 m *(2–3 ft)*

The dimensions of the plywood fan housing duct should be 2.4 m *(8 ft)* wide and 2.4 m *(8 ft)* high to accommodate various pallet sizes and heights. It should also be 1.2 m *(4 ft)* deep from front to back, to help create more uniform airflow, and to help stabilize the duct, considering the weight of the fan on the back side of the duct. The opening into the front side of the duct for the return air to the fan should be centred, be 1.2 m *(4 ft)* wide, and be as high as possible on the fan housing duct. See Figure 3.

Most forced-air coolers used in Canada operate with airflows in the range of 0.5–6 L/s/kg of product being cooled *(0.5–6 CFM/lbs)*. Higher airflow rates may reduce the cooling time, but doubling the airflow rate does **not** cut the time in half. It is very important to understand that *higher airflows do not necessarily mean the product will always cool quicker, since adequate refrigeration and prevention of short-circuiting are usually more critical.* Also, it may be impractical to operate with very high airflows, since the fans might need to be extremely large. There are reports of situations where very high airflows have caused such high static pressures that tarps have been pulled into

the tunnel. Regardless of how small the airflows, any amount of refrigerated air properly pulled through the produce will dramatically reduce cooling times compared to simple room cooling.

Foam/Tarp/Plastic To Prevent Short-Circuiting

One of the most important, but most often overlooked requirements of a good forced-air cooler is the method used to prevent short-circuiting of the cooling air. Air always takes the path of least resistance, so even small cracks must be plugged. It doesn't take much of a hole to reduce airflows through the mass of produce. A well-designed, tight system may have at least 10% of its air short-circuiting (Thompson, 1996). Poorly designed and operated systems could have most of their air short-circuiting.

There are many locations for air to short-circuit (see Figure 6):

- forklift openings
- shipping containers that do not fit tightly on the sides or top, or to the pallet dimensions
- where pallets fit against the forced-air cooler
- between the top containers on a pallet and a loose-fitting tarp.

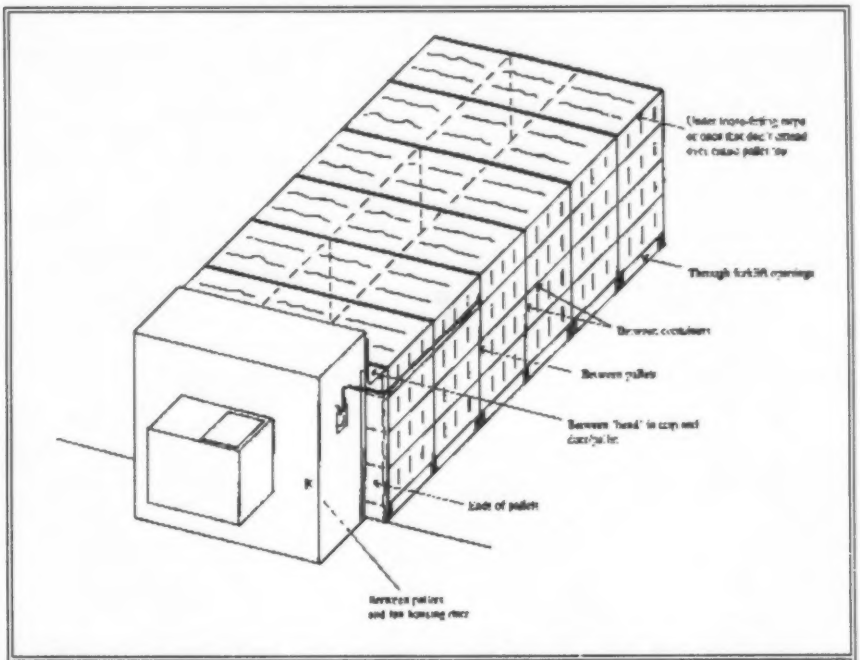

Figure 6: Plugging up locations where air can short-circuit is critical with a tunnel forced-air cooler.

To demonstrate the problem of short-circuiting, consider the previous example in Figure 6. Cooling air can enter the tunnel only via the outside face of the containers, an area of:

$$1.5\ m \times 1.2\ m \times 3\ pallets/side \times 2\ sides = 10.8\ m^2$$
$$(5\ ft \times 4\ ft \times 3 \times 2 = 120\ ft^2)$$

The tunnel area required was previously calculated to be about 1.0 m^2 *(10.5 ft^2)*. Thus, a short-circuit leakage area of only 10% would supply all the necessary return air area. Little air would pass through the produce, which already has a higher resistance to air

flow. The six pallet forklift openings alone have a combined opening of about 0.12 m^2 *(1.5 ft^2)* This is why it is important to seal off any and all leakage paths.

Heavy plastic or canvas tarps must be pulled over the produce containers to help force the cooling air to travel uniformly in one direction through the produce. Heavy foam strips or door sealers are often installed on the front of the fan-housing duct against which the first pair of pallets are pressed, creating an effective air seal. See Figure 3. *The importance of checking for air leaks after construction cannot be stressed enough.*

For pallet systems, the ideal shipping containers to forced-air cool are ones that stack tightly on all sides and fill out the entire footprint of the pallet. Figure 7 compares a straight-walled container that fits on all six sides, top and bottom like *LEGO*™ blocks with those that have tapered-walls and don't fit tightly on the tops and bottom. For tapered-walled containers, air short-circuits through the tapered areas rather than through the produce, even if the taper angle is very slight (Vigneault & Goyette, 1995). For straight-walled containers that fit tightly on the sides and top, air must travel through the produce, resulting in quicker, more uniform cooling. See Figure 8. More specifically, the ideal containers to forced-air cool have vents that are:

- 25% of the area perpendicular to the airflow direction (Vigneault & Goyette, 1995)
- evenly distributed
- lined up along the cooling path
- long slots rather than round holes to prevent plugging with produce
- unrestricted by liners, trays, pack materials.

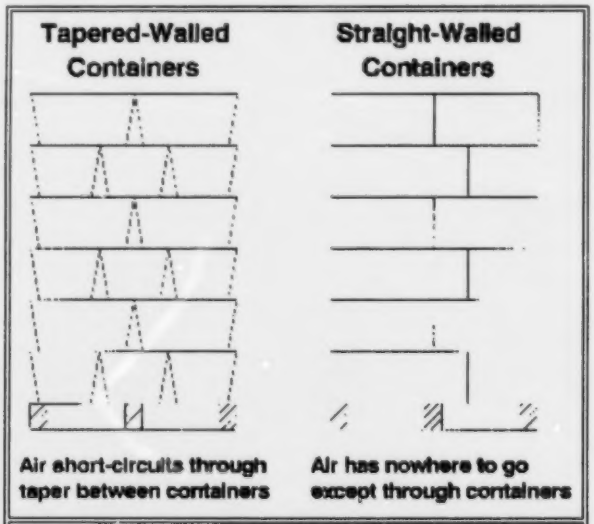

Figure 7: Containers should fit tightly on all sides, be vented to provide uniform airflow, and fit the pallet footprint, usually 1.2 m x 1.0 m (48 in. x 40 in.)

Figure 8: Two tunnel forced-air coolers, side by side, being used to cool cauliflower in a research test comparing straight-walled, collapsible plastic containers (left) and tapered-walled, nestable plastic containers (right). Air will short-circuit through the tapered gaps. Note the stiffeners sewn into the tarp to help prevent the tarp from being sucked into the tunnel during operation.

A $50 static pressure gauge, or manometer (Figure 9) assists in determining how much short-circuiting is occurring. The low pressure tube should be installed inside the tunnel between the pallets as far as possible from the fan (Boyette, 1994). See Figure 3. The high pressure tube should be installed in the normal airflow of the cold storage room. For most applications, the difference should measure about 12 mm *(0.5 in.)* static pressure of water column. This measures the load that the fan must work against to pull the air through. By plugging short-circuiting holes, the static pressure will rise, indicating that the fan is working harder to pull the air through the produce and ensuring that cooling air is travelling through the containers and not around them.

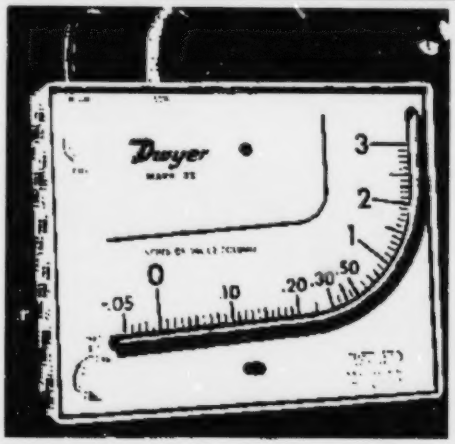

Figure 9: A manometer, or static pressure gauge, can help find air short-circuiting locations.

Common methods of preventing short-circuiting are: foam or door seals between the pallets and the forced-air cooling unit; corrugated cardboard or plastic strips between pallets and on the ends of them or on forklift openings that are sucked into place by the air pressure; or cushioned floor bumpers that pallets butt up against to prevent short-circuiting through the forklift openings.

Refrigeration System

There is an old saying that *you can never have too much refrigeration* in a cold storage. This certainly applies to forced-air cooling systems. Because cooling commences immediately after produce is placed on the unit, and the slope of the cooling curve is so steep initially (Figure 4), the amount of refrigeration required at the beginning of cooling is enormous. It is often much more than most growers can afford, or need. The formula for the *refrigeration* in kilowatts, kW, *(Btu/hr)* needed at any time is adapted from the formula for the *momentary* cooling rate (Mitchell et al, 1972):

kW needed (Btu/hr) = 2.1 x (A – B) x C x D ¸ E

A = Temperature of produce, °C (°F)
B = Temperature of cooling air, °C (°F)
C = Weight of produce being cooled, kg (lbs)
D = Specific heat of produce, usually about 3.77 kJ/kg/ °C (0.9 Btu/lb/ °F)
E = 7/8 cooling time (hr)

In the previous example, what cooling capacity is required to cool 2275 kg *(5,000 lbs)* of strawberries from 28°C *(82°F)* to 3.5°C *(38°F)* in 2 hours, using 0°C *(32°F)* cooling air (*7/8 cooling time* of 2 hours)?

Using the formula above, the *momentary* refrigeration at the beginning of cooling (worst case scenario) would be:

2.1 x (28°C – 0°C) x 2275 kg x 3.77 kJ/kg/°C ÷ 2 hr
= 252,150 kJ/hr, or 70 kJ/s or 70 kW

2.1 x (82°F – 32°F) x 5000 lbs x 0.9 Btu/lb./°F ÷ 2 hr
= 236,250 Btu/hr

This is almost 20 tons of refrigeration! There are 3.5 kW *(12,000 Btu/hr)* in a ton of refrigeration, a term used by industry. Most growers cannot afford to design for the worst case. However, if they learn to accept that the temperature of the room will rise slightly initially when produce is placed on the forced-air cooler, but that it will gradually recover, they can design with lower refrigeration levels. With good management, the suggested rule of thumb is to design for about 2/3 of the *momentary* maximum refrigeration rate at the beginning of cooling:

70 kW x 2/3 = 47 kW

(236,250 Btu/hr x 2/3 = 157,500 Btu/hr)

This is about 13 tons of refrigeration *over and above* the amount required for heat loads produced elsewhere in the storage such as through doors, walls and ceiling. The produce heat load would likely represent at least 80% of the total heat load in the storage.

Unless the system is designed for it, do not duct the warmed air from the forced-air cooling fan directly to the evaporator coils, or the cold air from the evaporator coils directly to the pallets being forced-air cooled. In most cases, the evaporator coils and fans were not designed for this application. When using a forced-air cooling system in a room used for holding produce that is already cooled, direct the exhaust air from the forced-air cooling fan away from any produce, and towards the evaporator coils.

The relative humidity of the cooling air in the forced-air cooling room should be greater than 85% to help prevent wilting of the produce. This means large evaporator coil cooling surfaces, and small temperature drops across the cooling coils. If a cold storage room is kept at 0°C *(32°F)*, and the evaporator cooling coils are sized too small, the air coming off the coils will be several degrees below freezing. This dries out the air and

keeps the relative humidity in the room too low for fresh fruits and vegetables. The produce could be damaged through chilling if this air is not allowed to warm up slightly in the room first, before being drawn through the produce by the forced-air cooler.

It is important to keep the cooling air as close as possible to the set point temperature, especially near the end of the forced-air cooling period. If the air rises a few degrees, the product could stop cooling and even rise in temperature. This points out the need to have separate forced-air cooling rooms, with plenty of refrigeration capacity.

Some refrigeration systems such as the *Filacell System*, are specifically designed with forced-air cooling in mind. It has high capacity fans that can handle high static pressures, while providing very high humidity. Consult a refrigeration contractor on the options available.

Monitoring Equipment

Monitoring equipment can help manage the forced-air cooler. Some of the important pieces of management information are the:

- starting temperature of the produce
- desired ending temperature of the produce
- maximum time that produce can be forced-air cooled.

All of these issues are more critical for first-time users of a forced-air cooler.

The internal temperature should be taken on a few pieces of produce on the pallet before placement on the forced-air cooler. This means probing the centre of the produce with good temperature measuring equipment that gives an instantaneous digital readout. See Figure 10. The produce temperature may not be the same as the surrounding air temperature. Large produce such as cantaloupe or cabbage will take longer to warm up (or cool down) than smaller produce such as plums, even if the surrounding air temperature is rising (or falling) rapidly. For example, the outside air temperature at mid-morning may be higher than the temperature of the peaches still on the tree because they may still be cool from the night before, or because of leaf shading. Conversely, strawberries may be hotter than the air temperature if the sun is beating down on their dark colouring. Also, produce on the top of a bin, basket, or box may be warmer than produce buried underneath because of direct sunlight, or heat conducting from a hot, dark container.

Most operators know at what temperature they want their produce stored. Unfortunately, when things get busy at harvest, produce sometimes cannot stay on the forced-air cooler as long as necessary. However, by knowing the starting temperature of the produce, operators can make better judgements about what temperature the produce will be after a period of time on the forced-air cooler.

Figure 10: A hand-held, portable, digital readout, temperature probe is an essential management tool in determining the starting and ending temperatures of the produce.

It is difficult and time-consuming to monitor the temperature of the produce as it is cooling. However, one way of estimating the actual temperature of the produce at any time is to monitor the temperature of the exhaust air from the forced-air cooling fan, then compare it to the temperature of the cooling air in the room as it enters the pallet. The exhaust air, will be about midway between the cooling air entering the pallet and the produce temperature at that time.

If the cooling air in the room entering the pallet is at 2°C, and the exhaust air from the forced-air cooling fan is at 10°C, the produce would be at about 18°C, since 10°C is midway between 2°C and 18°C. Produce that feels the cold air first will cool more quickly than produce that is downstream, because downstream produce feels warmer air. If there is a lot of short-circuiting of air, this method of monitoring is **not** reliable, since more cold air would make its way to the fan, lowering the exhaust air temperature, and giving the operator a false sense of the cooling progress.

A thermostat can be placed in the exhaust air from the forced-air cooling fan to either shut it off when the airflow reaches a certain temperature, or slow it down if it is a variable speed fan. This can help prevent running the equipment longer than needed, saves on electrical power, and prevents needless adding of heat from motors in the cold storage. A timer to turn off the fan after a period of time could be installed, if appropriate.

| Top of Page |

10 Steps to Designing a Forced-Air Cooler

1. Determine average day's production, kg *(lbs)*
1. Determine heavy day's production, kg *(lbs)*
1. Determine available cooling time (hours/day)
1. Establish number of batches (batches/day)
1. Calculate size of batch, kg/batch *(lbs/batch)*
1. Pick an airflow rate, L/s/kg *(CFM/lbs)*
1. Calculate fan airflow rate, L/s *(CFM)*
1. Calculate peak refrigeration, kW *(Btu/hr)*
1. Use *2/3 refrigeration rule*, kW *(Btu/hr)*
1. Determine tunnel width and gap to wall, m *(ft)*

| Top of Page |

Case Study

A grower has 4 ha *(10 ac)* of strawberries, and picks 3000 masters/ha *(1200 masters/ac)* at 6 kg/master *(13.2 lbs/master)* over a 25 day harvest season. Pallets hold 64 masters, are 1.5 m high *(5 ft)*, and weigh 384 kg *(845 lbs)*. Picking is from 6:00 a.m. – 12:00 noon, with berries at an average of 25°C *(77°F)*. The cold storage is at 0°C *(32°F)*. Determine the size of fan, extra refrigeration needed and the width of the tunnel and gaps.

1. **Determine average day's production, kg (lbs)**
   4 ha x 3000 masters/ha x 6 kg/master ÷ 25 d = 2880 kg/d
   10 ac x 1200 masters/ac x 13.2 lbs/mast ÷ 25 d = 6340 lbs/d
2. **Determine heavy day's production, kg (lbs)**
   The daily harvest could probably range all the way up to 10000 kg picked (22000 lbs). It is unrealistic to design for the busiest day of the season, but one rule of thumb is to design for a *typical heavy* day, which is often *twice the average day*. So:

   2880 kg/ave. day x 2 = 5760 kg/typical heavy day
   (6340 lbs/ave. day x 2 = 12680 lbs/typical heavy day)
3. **Determine available cooling time (hours/day)**
   Picking is from 6:00 a.m. – 12:00 noon, or 6 hours. The earliest berries to go on the forced-air cooler would be at about 7 a.m., with berries arriving at the cold storage continually after that until 12:00 noon. Forced-air cooling can proceed as long as necessary after 12:00 noon, so estimate the available cooling time as *6 hours*, from 7:00 a.m. to 1:00 p.m. The last berries picked are generally the hottest berries picked, so they can stay on the forced-air cooler longer, if necessary.
4. **Establish number of batches (batches/day)**
   From Table 2, it is reasonable to want a *7/8 cooling time* of 1.5 hours for strawberries, so:

   6 hrs available/day ÷ 1.5 hr/batch = 4 batches/day
5. **Calculate size of batch, kg/batch (lbs/batch)**
   5760 kg/day ÷ 4 batches/day = 1440 kg/batch
   (12680 lbs/day ÷ 4 batches/day = 3170 lbs/batch)

   This would be 240 masters/batch, or 4 pallets.
6. **Pick an airflow rate, L/s/kg (CFM/lbs)**
   From Table 2, a *7/8 cooling time* of 1.5 hours corresponds approximately to an airflow rate of 2.0 L/s/kg of produce *(2 CFM/lbs)*. The higher the airflow, the quicker the cooling time, and the lower the airflow, the slower the cooling time. Predicting the *7/8 cooling time* is difficult, since it depends on so many variables.
7. **Calculate fan airflow rate, L/s (CFM)**
   2.0 L/s/kg x 1440 kg/batch = 2880 L/s (2.88 m^3/s)
   (2.0 CFM/lbs x 3170 lbs/batch = 6340 CFM)

   Table 3 suggests a centrifugal fan with a 2.25 kW motor *(3 h.p.)* would suffice. Otherwise, ask a fan supplier for a fan that will deliver at least 2880 L/s at a static pressure of 25 mm *(6340 CFM at 1 inch static pressure)*.
8. **Calculate peak refrigeration, kW (Btu/hr)**
   2.1 x (25°C – 0°C) x 1440 kg x 3.77 kJ/kg/°C÷1.5 hr
   = 190000 kJ/hr or 53 kJ/s or 53 kW or 15 tons

   2.1 x (77°F – 32°F) x 3170 lbs x 0.9 Btu/lb/ °F ÷1.5 hr
   = 179750 Btu/hr or 15 tons refrigeration

   This is for cooling the berries, not the room itself!

9. **Use 2/3 refrigeration rule, Watts (Btu/hr)**
   15 tons of refrigeration is a lot for a forced-air cooler with 4 pallets of berries at one time. So:

   53 kW (theory) x 2/3 = 35 kW (practical); 10 tons
   179750 Btu/hr x 2/3 = 119,800 Btu/hr;10 tons
10. **Determine tunnel width and gap to wall, m (ft)**
    2.88 m^3/s ÷ 5 m/s max. airspeed = 0.58 m^2 min. area

    6340 CFM ÷ 1000 ft/min max. = 6.34 ft^2 min. area

    With pallets 1.5 m high *(5 ft)*, the tunnel width must be a minimum of 0.58 m^2 ÷ 1.5 m = 0.4 m, however, a practical minimum is 0.6 m *(2 ft)*. The gap to wall would also be the minimum 0.3 m *(1 ft)* to allow an operator to squeeze down the gap.

| Top of Page |

Other Considerations

- the tarp over the tunnel should extend as close to the top outer edge of the pallets as possible, and all the way to the floor at the end of the pallet row to prevent short-circuiting of air
- stiffeners woven into the tarp are needed to prevent it from being sucked into the tunnel
- check for air leakage using cellophane that will suck into uncovered holes
- the fan should be centred in the duct so as to draw air as evenly as possible from the tunnel
- large batches harvested early in the day represent a similar heat load to small batches harvested later the same day
- empty containers and harvested product should be covered with tents or awnings in the field to minimize heat gain
- as the day heats up, reduce the time that product sits in the field before being cooled

| Top of Page |

References

Commercial cooling of fruits and vegetables. Mitchell, F.G., R. Guillou, R. A. Parsons. Manual 43. University of California. P.33. 1972.

Contenants réutilisables pour la manutention des fruits et légumes frais: Effet de la forme du contenant, la largeur et le pourcentage d'ouvertures lors du prérefroidissement à l'air forcé. Vigneault, C., B. Goyette. Rapport Confidentiel. Centre de Recherche et de Développement en Horticulture. Agriculture et Agro-Alimentaire Canada. St.Jean-sur-Richelieu. 13 pp. 1995.

Forced-air cooling, maintaining the quality of North Carolina fresh produce. Boyette, M. D., L. G. Wilson, E. A. Estes. North Carolina Cooperative Extension Service. July. 1994.

Forced-air cooling. Thompson, J. F. Perishable handling newsletter. Issue No.88. November. pp 2-11. 1996.

| Top of Page |

This Factsheet was authored by: Hugh Fraser, P.Eng., Agricultural Engineer

specializing in Horticultural Crops Structures and Equipment, OMAFRA, Vineland.

This Factsheet was reviewed by: Bert Van Dalfsen, P.Eng., British Columbia Ministry of Agriculture Fisheries and Food, Clément Vigneault, Ph.D., P.Eng., Agriculture and Agrifood Canada, Dennis Darby, P.Eng., Alberta Agriculture, Don Allen, P.Eng., D.A. Allen Engineering Services, Nova Scotia, Florent Mercier, P.Eng., Université Laval, Quebec.

For more information...contact Hugh Fraser at hfraser@omafra.gov.on.ca.

| Top of Page |

| Crops Home Page |

| Central Site | Feedback | Search | Site Map | Français |
| Home | What's New | Calendar | Products | News Releases |

Ontario
This page maintained by the Government of Ontario

This information is provided as a public service, but we cannot guarantee that the information is current or accurate.
Readers should verify the information before acting on it.

Feedback and technical inquiries to: crops@gov.on.ca
©Copyright 2000 Queen's Printer for Ontario

FICHE TECHNIQUE
ISSN 1196-7138 Imprimeur de la Reine pour l'Ontario

Agdex: 736/202 Date de publication: 06/98
Commande no. 98-032 Dernière révision: 06/98

Titre: Tunnel de refroidissement par air pulsé pour le conditionnement des fruits et des légumes frais

Division: Agriculture et affaires rurales
Situation:
Rédacteur: Hugh W. Fraser, P. Eng.

Table des matières

1. Introduction
2. Pourquoi faut-il refroidir les fruits et légumes aussi rapidement que possible?
3. Quel est le principe du refroidissement par air pulsé?
4. Les « durées de refroidissement 7/8 »
5. Quels produits peut-on refroidir par air pulsé?
6. De quoi est fait un tunnel de refroidissement par air pulsé?
7. Les 10 étapes du calcul des paramètres d'une installation de refroidissement par air pulsé
8. Étude de cas
9. Autres considérations
10. Références bibliographiques

Introduction

La présente fiche technique explique comment concevoir, construire et exploiter un tunnel de refroidissement par air pulsé, de taille commerciale suffisante pour traiter à la fois de deux à six palettes de fruits et de légumes frais. Les installations de refroidissement par air pulsé sont d'utilisation courante dans la plupart des grandes régions maraîchères. On peut voir sur les figures 1 et 2 un grand tunnel de refroidissement par air pulsé qui est utilisé dans une station fruitière de la Californie pour refroidir des fruits à noyaux. Comme certaines cultures demandent à être refroidies plus rapidement que d'autres après la récolte, il faut calculer les paramètres techniques du tunnel de sorte qu'il puisse fournir le débit d'air par poids unitaire de produit qui correspond aux besoins de la culture en question. Les règles de base énoncées dans la présente fiche peuvent servir à calculer les paramètres d'installations plus grandes ou plus petites selon les besoins. La figure 3 est le schéma d'un tunnel de refroidissement par air pulsé.

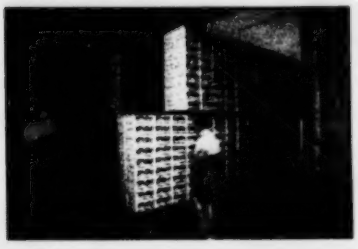

Figure 1. Tunnel de refroidissement par air pulsé conçu pour refroidir deux

couches de palettes de fruits à noyau à la fois, dans une station fruitiuère de la Californie. Le tunnel se trouve sous la bâche noire entre les deux rangées de palettes.

Figure 2. Tunnel formé par des palettes de fruits ou de légumes placées contre une installation constituée d'un ventilateur et d'un conduit. La bâche qui recouvre le tunnel force l'air à circuler dans le sens perpendiculaire à la longueur du tunnel et à travers les côtés des contenants.

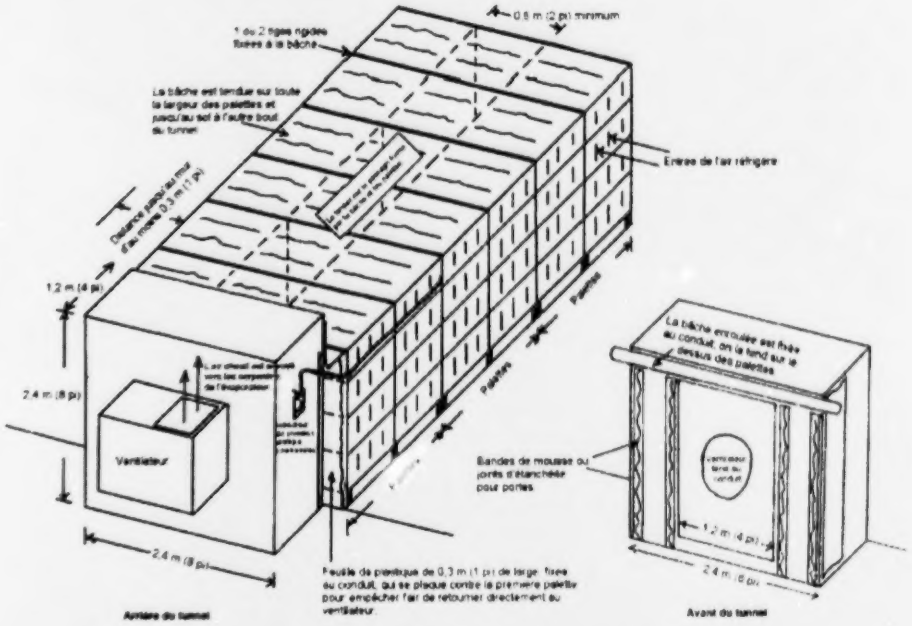

Figure 3. Vue schématique de l'avant et de l'arrière d'un tunnel de refroidissement par air pulsé utilisé pour le conditionnement des fruits et des légumes frais en contenants sur palettes.

| Haut de la page |

Pourquoi faut-il refroidir les fruits et légumes aussi rapidement que possible?

Tous les fruits et tous les légumes frais sont des organismes vivants, même après la récolte, et il faut les maintenir vivants et en bon état jusqu'à leur transformation ou leur consommation (Fraser, 1991). C'est dans ses propres réserves que la plante puise l'énergie nécessaire pour se maintenir en vie. Elle convertit ces réserves en énergie par le phénomène de la *respiration*. Celle-ci s'accompagne d'un dégagement d'énergie sous forme de chaleur, dont la quantité, ou intensité respiratoire, varie selon le type et la variété de produit, le degré de mûrissement, l'importance des meurtrissures et la *température* du produit.

C'est la température du fruit ou du légume qui influe le plus sur l'activité respiratoire. Le refroidissement prompt, rapide et uniforme dès la récolte, c'est-à-dire l'élimination de la chaleur de récolte, est cruciale pour abaisser l'intensité respiratoire. Le refroidissement ralentit le processus de détérioration et permet au produit d'avoir une plus grande durée de conservation à l'étalage. *La règle empirique veut que pour chaque heure de retard dans le refroidissement, la durée de conservation du produit diminue d'une journée.* La règle ne se vérifie pas pour toutes les cultures, mais elle s'applique surtout aux cultures très périssables par forte chaleur.

En abaissant la température du fruit ou du légume, on réduit aussi le taux de production d'éthylène, la déshydratation, la multiplication des microorganismes et la détérioration consécutive aux lésions.

| Haut de la page |

Quel est le principe du refroidissement par air pulsé?

Le refroidissement par air pulsé n'est qu'une des méthodes utilisées pour extraire la chaleur de récolte des produits fraîchement cueillis. Il est applicable à la plupart des fruits et des légumes. Il met en oeuvre des ventilateurs de forte puissance qui aspirent l'air réfrigéré pour le forcer à passer à travers les tas de produits à refroidir. Le refroidissement rapide et uniforme, de type convectif, résulte de la circulation active de l'air réfrigéré, pulsé à grande vitesse, autour des fruits ou des légumes tièdes. La méthode est différente du refroidissement en chambre froide où les produits sont simplement entreposés dans un local froid et refroidissent lentement et de façon non uniforme, principalement sous l'effet de la conduction et aussi par contact convectif naturel avec l'air réfrigéré.

Il est préférable de faire circuler l'air à travers la masse du produit en l'*aspirant*, plutôt qu'en le *soufflant*, car il est alors plus facile d'empêcher au maximum l'air réfrigéré de faire des « courts-circuits », c'est-à-dire de l'empêcher de retourner directement au ventilateur sans passer à travers la masse du produit. L'air ne circule pas aussi uniformément quand il est soufflé que lorsqu'il est aspiré à travers le produit. À condition que les contenants aient été conçus en conséquence et qu'ils soient empilés dans le sens voulu, le produit peut être refroidi rapidement et uniformément, qu'il soit dans des paniers, des cageots, des bacs ou des sacs. Une enceinte de refroidissement par air pulsé utilise bien plus efficacement l'air réfrigéré qu'une chambre froide.

Malgré le surcoût que cela suppose, il vaut mieux aménager une chambre froide réservée au refroidissement par air pulsé et transporter le produit refroidi vers un local réfrigéré où il sera entreposé pendant plus longtemps. Dans la plupart des chambres froides utilisées pour refroidir par air pulsé, la température s'élève à chaque arrivage d'un lot de fruits ou de légumes tièdes. Si ce réchauffement est important à cause de la capacité insuffisante du groupe frigorifique, les autres fruits ou légumes froids entreposés dans la chambre se réchauffent et transpirent. Ces deux situations sont inacceptables. Un bon compromis consiste à aménager une aire de refroidissement à air pulsé en isolant un coin de la chambre froide à l'aide d'une bâche suspendue au plafond. Cette solution contribue à réduire les fluctuations de température, mais elle doit être considérée comme un pis-aller.

| Haut de la page |

Les « durées de refroidissement 7/8 »

Chez tous les fruits et les légumes, le refroidissement est d'abord rapide, puis de plus en plus lent. La vitesse de refroidissement par air pulsé est sous la dépendance de plusieurs facteurs :

- la densité des produits à l'intérieur des contenants (moins les produits sont tassés, plus vite ils refroidissent);
- le type de contenant, le sens de l'empilement, les caractéristiques des entrées d'air (si l'air rentre uniformément en plusieurs endroits du contenant, le refroidissement est plus rapide);
- le rapport volume/surface du produit; plus le rapport est bas, plus le refroidissement est rapide (les cerises refroidissent plus vite que les melons);
- la distance parcourue par l'air réfrigéré (plus son trajet est court, plus le

refroidissement de la pile tout entière est rapide);
- la capacité de débit d'air (plus le débit est élevé, plus le refroidissement est rapide);

L'humidité relative de l'air réfrigéré influe peu sur la déshydratation des produits dès l'instant qu'elle est supérieure à 85 % et que le refroidissement dure moins d'une ou deux heures.

Quelle que soit la température de l'air de refroidissement ou celle du produit entrant, la courbe de refroidissement reste la même si tous les autres facteurs évoqués ci-dessus sont gardés constants. Seule la vitesse de refroidissement change.

L'expression *durée de refroidissement 7/8* s'emploie couramment dans l'industrie pour désigner le temps nécessaire pour extraire les sept huitièmes (87,5 %) de la différence entre la température du produit entrant et la température de l'agent de refroidissement (l'air réfrigéré, dans le cas du refroidissement par air pulsé). C'est une méthode commode pour savoir au bout de combien de temps la température des produits sera ramenée aussi près qu'il est possible et pratique de le faire de la température de l'agent de refroidissement. Le refroidissement par air pulsé doit commencer aussitôt qu'il est possible de le faire, de préférence dans l'heure qui suit la récolte. Il ne faut pas laisser les fruits ou les légumes s'accumuler avant de les placer dans le tunnel de refroidissement, sinon ils perdent de leur qualité et de leur faculté de conservation. La *durée de refroidissement 7/8* est mesurée à partir de l'instant où le produit est placé dans le tunnel (figure 4).

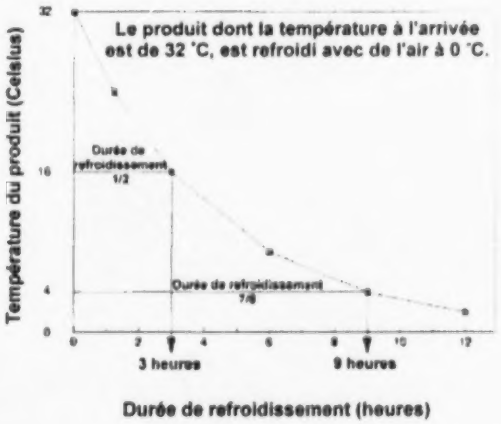

Figure 4. Courbe caractéristique de la température des produits en fonction du temps de refroidissement

Par exemple, si, avec de l'air à 0 °C, il faut neuf heures pour abaisser à 4 °C la température d'une pêche qui était de 32 °C à son arrivée, *la durée de refroidissement 7/8* est de 9 heures. Autrement dit, l'écart de température entre le produit et l'air de refroidissement, qui était de 32 °C, a été diminué de 28 °C. La durée de refroidissement 7/8 est théoriquement trois fois plus longue que la durée de refroidissement 1/2. En conséquence, la même pêche qui a mis 9 heures pour refroidir à 4 °C, ne mettrait que 3 heures pour refroidir à 16 °C, la température correspondant à la durée de refroidissement 1/2, toutes choses restant égales par ailleurs. En pratique, la durée de refroidissement 7/8 ne correspond pas souvent à trois fois la durée de refroidissement 1/2 parce que les conditions demeurent rarement égales pendant toute la durée du refroidissement.

Quelquefois on est en mesure d'estimer au bout de combien de temps un produit sera refroidi aux 7/8 si l'on connaît les autres durées de refroidissement. Le tableau 1 indique quelques rapports entre les durées de refroidissement.

Tableau 1 : Facteurs servant au calcul de la durée de refroidissement 7/8

Si vous connaissez ...	... multipliez par le facteur ci-dessous pour estimer la *durée de refroidissement 7/8*
la durée de refroidissement 1/4	7,5
la durée de refroidissement 3/8	4,5
la durée de refroidissement 1/2	3,0
la durée de refroidissement 3/4	1,5

Pour ce qui concerne certaines cultures, il peut ne pas être nécessaire de faire fonctionner le tunnel de refroidissement par air pulsé à une température aussi basse que la température d'entreposage optimale. Par exemple, on peut refroidir certains fruits et légumes avec de l'air pulsé à 5 °C, puis les placer dans une chambre froide adjacente où ils finiront de refroidir plus lentement. Ce compromis permet de faire l'économie d'un système de dégivrage du groupe frigorifique dans la chambre de refroidissement par air pulsé.

| Haut de la page |

Quels produits peut-on refroidir par air pulsé?

La plupart des fruits et des légumes peuvent être refroidis par air pulsé, mais la *durée de refroidissement 7/8* devrait être plus courte pour certains produits dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ceux dont l'intensité respiratoire est élevée à la récolte;
- ceux qui se déshydratent facilement (petits fruits/légumes-feuilles);
- ceux qui sont très mûrs, par exemple des pêches mûries sur l'arbre;
- ceux qui sont destinés à voyager loin.

Le tableau 2 donne la liste des fruits et des légumes qui demandent à être refroidis très vite, la *durée de refroidissement 7/8* et le débit d'air conseillés.

Tableau 2 : Fragilité relative des fruits et des légumes frais, débits d'air et durées de refroidissement 7/8 recommandés

Fragilité relative des fruits et légumes périssables	Culture	Durée de refroidissement 7/8 (heures)	[b]Débit d'air L/s/kg *(PCM/lb)*
Très périssables	[a]Asperge, [a]brocoli, [a]laitue en feuilles, [a]épinard, [a]maïs sucré, champignons	0,75-1,5	6 - 2 (6 - 2)
Périssables	Bleuets, framboises, fraises, cerises sucrées, choux-fleurs, haricots mange-tout, laitue pommée	1-2,5	4 - 1,25 (4 - 1,25)
Moyennement périssables	Pommes (hâtives), choux (hâtifs), melons brodés, [a]céleri, pêches, prunes, poivrons, courges d'été	2-6	1,5-0,5 (1,5-0,5)

[a] Il peut être avantageux d'asperger de l'eau sur le fruit ou le légume, ou de nébuliser de l'eau dans l'air de refroidissement avant de le faire circuler dans les contenants.

[b] Les débits élevés sont indiqués en premier de façon à correspondre aux durées de refroidissement 7/8 courtes.

Cultures très périssables

Les cultures très périssables ont toutes une intensité respiratoire très élevée lorsqu'elles sont récoltées et elles se déshydratent rapidement dès la cueillette. Il *faut* les refroidir rapidement et aussitôt que possible après la récolte, sinon elles se conserveront peu de temps voire pas du tout. Il est plus traditionnel de refroidir certaines de ces cultures avec de l'eau, de la glace, ou sous vide. Néanmoins, on peut toutes les refroidir par air pulsé, à condition de faire vite, de mettre en oeuvre un débit élevé et un air dont l'humidité relative est élevée pour réduire le risque de déshydratation du produit. On conseille d'utiliser des débits d'air d'au moins 2 à 6 L/s par kg de produit (*2 à 6 PCM/lb*), en visant des *durées de refroidissement 7/8* qui ne dépassent pas 45-90 minutes. Il faut surveiller les produits pour détecter tout signe de déshydration. À cet égard, il peut être bénéfique des les asperger d'eau avant de les mettre à refroidir par air pulsé (exception faite des champignons). Ne pas faire fonctionner le tunnel de refroidissement par air pulsé plus longtemps que nécessaire.

Cultures périssables

Ces cultures ont une intensité respiratoire élevée lorsqu'elles viennent d'être récoltées et (ou) elles se déshydratent rapidement, mais il n'est pas aussi crucial de les refroidir aussi rapidement que celles dont il est question ci-dessus.

Les producteurs ont appris par expérience qu'ils *gagnent* à refroidir ces produits le plus rapidement possible après la récolte. On doit surveiller les produits pour détecter les signes de déshydratation. On conseille d'utiliser des débits d'air d'au moins 1 à 3 L/s par kg de produit (*1 à 3 PCM/lb*), et des *durées de refroidissement 7/8* qui ne dépassent pas une à trois heures.

Les haricots mange-tout doivent refroidir seulement à environ 4 °C - 7 °C (40 °F - 45 °F), selon le cultivar, sinon ils risquent d'être endommagés par le froid. On évite de les refroidir avec de l'air pulsé dont la température est inférieure à 4 °C, et on essaie autant que possible de les refroidir pendant moins de 3 heures. Comme ces légumes sont souvent lavés après la récolte, le refroidissement par air pulsé présente l'avantage supplémentaire de les ressuyer. La figure 6 montre un tunnel de refroidissement par air pulsé servant à refroidir des haricots mange-tout dans des cageots d'un boisseau.

Cultures moyennement périssables

Bien que ces cultures soient moins fragiles que les précédentes, il demeure *recommandé* de les refroidir rapidement et dès que possible après la récolte. Elles ne s'en conserveront que mieux. On conseille d'utiliser des débits d'air d'au moins 0,5 à 1,5 L/s par kg de produit (*0,5 à 1,5 PCM/lb*), et des *durées de refroidissement 7/8* qui ne dépassent pas trois à six heures.

Comme les melons brodés et les courges d'été sont sensibles aux altérations dues au froid, leur refroidissement par air pulsé très froid est à éviter. Il est conseillé de refroidir les melons brodés à environ 2 °C - 5 °C (34 °F - 41 °F), alors que les courges d'été doivent être refroidies à environ 7 °C -10 °C (45 °F - 50 °F).

| Haut de la page |

De quoi est fait un tunnel de refroidissement par air pulsé?

Les quatre composantes d'un tunnel de refroidissement par air pulsé sont les suivantes :

- une installation composée d'un ventilateur et d'un conduit;
- des bandes de mousse, une bâche ou une feuille de plastique pour empêcher l'air

de retourner au ventilateur sans traverser la masse du produit;
- un groupe frigorifique;
- des instruments de contrôle.

Le ventilateur et le conduit

Le ventilateur est le coeur de l'installation de refroidissement par air pulsé. Son débit se mesure en litres d'air par seconde (L/s) ou en *pieds cubes d'air par minute (PCM)*. Il varie selon le type du ventilateur (hélicoïdal ou centrifuge); la conception (forme et orientation des pales ou des aubes); la résistance à vaincre pour aspirer l'air à travers le produit (pression statique); la taille du moteur (puissance en chevaux-vapeur, hp, ou en watts); et le nombre de tours par minutes (tr/min) des pales ou aubes du ventilateur.

Les ventilateurs doivent être choisis en fonction du débit d'air qu'ils peuvent produire à une *pression statique* donnée entre l'entrée et la sortie du ventilateur. Pour la plupart des systèmes de refroidissement par air pulsé, les pressions statiques vont de 15 à 25 mm *(0,6-1,0 pouce)* de colonne d'eau. On peut utiliser indifféremment des modèles centrifuges (à aubes, comme les ventilateurs des chaudières à chauffage) ou des modèles hélicoïdaux (à pales). Au Canada, bon nombre d'installations de refroidissement sont équipées de ventilateurs centrifuges parce qu'il est facile d'en trouver d'occasion et qu'ils sont moins bruyants (figure 5).

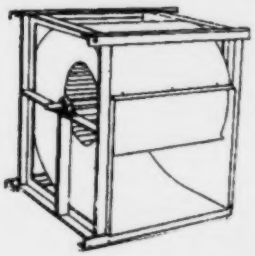

Figure 5. Dans les installations de refroidissement par air pulsé, on utilise souvent des ventilateurs centrifuges, à aubes, du type de ceux qui équipent les chaudières à chauffage.

De nombreux producteurs se procurent des ventilateurs centrifuges d'occasion pour leurs installations de refroidissement, mais il est difficile d'établir le débit d'air dans le cas de ces appareils. Néanmoins, et pour des *besoins de planification seulement*, on peut s'aider du tableau 3 pour *estimer* la capacité de ces ventilateurs.

Tableau 3. Fourchettes approximatives du débit d'air en L/s *(PCM)* des ventilateurs centrifuges (fourchette standard des TR/MIN; entrée à sens unique)

Taille du moteur	Débit approximatif, L/s (PCM) à la pression statique indiquée	
kW *(hp)*	12 mm *(0,5 po)*	25 mm *(1 po)*
0,37 *(0,5)*	1125-1225 *(2400-2600)*	-
0,75 *(1)*	1700-2450 (3600-5200)	1275-1500 *(2700-3200)*
1,1 *(1,5)*	2025-3075 *(4300-6525)*	1650-2275 *(3500-4800)*
1,5 *(2)*	2175-3550 *(4600-7525)*	1925-2825 *(4100-6000)*
2,25 *(3)*	2500-4250 *(5300-9000)*	2300-3575 *(4900-7600)*
3,75 *(5)*	3250-5200 *(6900-11000)*	3075-4750 *(6500-10000)*

Il est difficile de prédire à quelle pression statique doit fonctionner le ventilateur d'une installation de refroidissement par air pulsé. La pression statique est fonction de plusieurs facteurs : débit d'air, nombre et importance des entrées d'air percées dans les côtés des contenants, alignement des entrées d'air, distance parcourue par l'air à travers les produits, et éventuels obstacles au bon écoulement de l'air à l'intérieur du conduit. Pour la plupart des systèmes, les ventilateurs doivent être sélectionnés en vue d'un fonctionnement à la pression statique maximale de 25 mm (1 po) de colonne d'eau.

On trouve de nombreux types et modèles de ventilateurs. Les petits ventilateurs centrifuges demandent un plus gros moteur à régime (tr/min) plus élevé pour débiter autant d'air que les ventilateurs centrifuges plus gros. En général, les gros ventilateurs équipés d'un petit moteur sont plus efficients. On gagne à opter pour ce type d'appareil pour limiter les frais d'utilisation, le bruit, l'usure et les surcharges thermiques du groupe frigorifique. On se laisse en outre la possibilité de l'équiper un jour d'un moteur plus gros pouvant fournir de plus grands débits d'air si le besoin s'en fait sentir.

La grandeur des ouvertures d'admission d'air (extérieur des palettes) ou de retour d'air (tunnel) doit être calculée de façon à maintenir la vitesse de l'air inférieure à 5 m/s *(1000 pieds/min)*. Il faut donc prévoir au moins 1 m^2 de section par 5 000 L/s de débit (1 pied carré/1000 PCM). Des ouvertures plus petites limitent le débit d'air, rendent la tâche plus dure au ventilateur, incitent l'air à prendre des raccourcis près du ventilateur et ne favorisent pas un refroidissement uniforme.

Pour déterminer la superficie minimale des admissions d'air et la section du tunnel, supposons un système de refroidissement par air pulsé conçu pour refroidir 2 250 kg *(4 950 lb)* de produits empilés sur 6 palettes, avec un débit d'air 4 500 L/s, soit 2 L/s par kg *(9 530 PCM ou 1,9 PCM/lb)*. Voir la figure 3. Les palettes mesurent 1,2 m *(4 pi)* de large et 1,5 m *(5 pi)* de haut. On calcule le débit à l'aide de l'équation suivante :

$Q = A \times V$ ou $A = Q \div V$

où *Q* est le débit d'air, en L/s *(PCM)*

A est la surface de la section perpendiculaire à la direction de l'air, en m^2 *(pi^2)*

V est la vitesse de l'air, en m/s *(pi/min)*

Le débit étant de 4 500 L/s (4,5 m^3/s), la section du tunnel doit être au minimum de : $A = 4,5\ m^3/s \div 5\ m/s = 0,9\ m^2$

($A = 9\,530\ PCM \div 1000\ pi/min = 9,5\ pi^2$)

Ainsi, si les palettes mesurent 1,5 m de hauteur *(5 pi)*, la largeur du tunnel doit être au minimum de :

$W = 0,9\ m^2 \div 1,5\ m = 0,6\ m$

($W = 9,5\ pi^2 \div 5\ pi = 1,9\ pi$)

Pour des raisons pratiques, la largeur du tunnel ne doit pas être inférieure à 0,6 m *(2 pi)*.

Pour laisser rentrer l'air froid rentrer facilement dans les côtés des palettes, il faut également laisser un espace suffisamment large entre le bord externe des palettes et les murs ou éventuellement entre le bord externe des palettes et les palettes d'une installation voisine de refroidissement par air pulsé. Pour des raisons pratiques, la largeur de cet espace doit être *d'au moins* 0,3 m *(1 pi)* ou plus, pour qu'il soit possible à une personne de s'y glisser pour vérifier l'installation. Sauf si les débits d'air sont extrêmement élevés, cette largeur est amplement suffisante pour laisser l'air pénétrer sans effort dans les côtés des palettes.

Pour la plupart des applications, les dimensions minimales conseillées sont les suivantes :

- Largeur du tunnel : 0,6 - 1,2 m *(2 - 4 pi)*;

- Largeur libre entre l'installation et les murs : 0,3 - 0,6 m *(1 - 2 pi)*;
- Largeur libre entre deux installations de refroidissement voisines : 0,6 - 1 m *(2 - 3 pi)*

Les dimensions du conduit en contreplaqué recouvrant le ventilateur doivent être de 2,4 m *(8 pi)* de large sur 2,4 m *(8 pi)* de haut pour traiter des palettes de diverses tailles et hauteurs. Le conduit doit également mesurer 1,2 m *(4 pi)* de long entre le devant et le fond de façon que l'air s'écoule plus uniformément et que le conduit soit plus stable, compte tenu du poids du ventilateur qui est installé au fond. L'ouverture pratiquée sur le devant du conduit pour le retour de l'air au ventilateur doit être centrée; elle doit mesurer 1,2 m *(4 pi)* de large et être située aussi haut que possible sur le conduit (figure 3).

La plupart des installations de refroidissement par air pulsé qui sont utilisées au Canada fonctionnent à un débit situé entre 0,5 et 6 L/s par kilo de produit à refroidir *(0,5 à 6 PCM/lb)*. Des débits plus élevés peuvent réduire la durée de refroidissement, mais le fait de doubler le débit ne diminue pas la durée de moitié. Il est très important de comprendre que *des débits élevés ne signifient pas forcément un refroidissement plus rapide, car une réfrigération adéquate et le calfeutrage pour prévenir les courts-circuits sont d'ordinaire beaucoup plus importants*. En outre, il peut s'avérer peu pratique de fonctionner avec des débits très élevés, étant donné qu'alors, il faut souvent des ventilateurs extrêmement gros. On a vu des cas où un très gros débit d'air avait entraîné une telle pression statique que la bâche avait été aspirée à l'intérieur du tunnel. Mais quelle que soit la faiblesse du débit d'air, n'importe quel volume d'air réfrigéré aspiré convenablement à travers les fruits et les légumes raccourcira considérablement les durées de refroidissement, si l'on compare avec le refroidissement dans une chambre froide ordinaire.

Pose de bandes de mousse, d'une bâche ou d'une feuille de plastique pour empêcher les « courts-circuits »

Un des aspects les plus importants mais souvent le plus négligé du bon fonctionnement d'un tunnel de refroidissement par air pulsé est la méthode utilisée pour empêcher les courts-circuits, c'est-à-dire empêcher l'air réfrigéré de retourner au ventilateur par le chemin le plus court. Comme l'air emprunte toujours le chemin où il rencontre le moins de résistance, il faut calfeutrer les interstices même les plus petits. Il n'est pas nécessaire qu'un trou soit bien grand pour réduire le débit de l'air qui traversera la masse des produits. Même dans un système étanche bien conçu, on peut s'attendre à ce qu'au moins 10 % de l'air retourne au ventilateur sans passer à travers les contenants de produits (Thompson, 1996). Lorsque le système est mal conçu et mal exploité, c'est la majorité de l'air qui peut prendre les chemins les plus courts.

Il y a de nombreux endroits par où l'air se faufile pour prendre le chemin le plus court (figure 6):

- les fentes prévues pour les bras du chariot élévateur;
- les espaces laissés entre les contenants d'expédition et les côtés ou le dessus de la palette parce que leur forme ou leurs dimensions ne sont pas adaptées à cette dernière;
- l'espace entre les palettes et l'installation de refroidissement à air pulsé;
- l'espace entre les contenants du dessus d'une palette et une bâche mal ajustée.

Pour démontrer le problème des courts-circuits, reprenons l'exemple précédent illustré par la figure 8. L'air réfrigéré peut entrer dans le tunnel seulement par le côté externe des contenants, soit une superficie de :

1,5 m x 1,2 m x 3 palettes/côté x 2 côtés = 10,8 m^2

(5 pi x 4 pi x 3 x 2 = 120 pi^2)

Nous avons précédemment calculé que la section du tunnel doit être d'environ 1,0 m^2 *(10,5 pi^2)*. Par conséquent, il suffit que la surface totale des défauts d'étanchéité soit de 10 % pour que la totalité de l'air réfrigéré emprunte ces passages pour retourner au ventilateur. Il ne passerait que peu d'air à travers le produit, lequel oppose déjà une résistance plus élevée à l'écoulement de l'air. Les six fentes prévues pour les bras du chariot élévateur, à elles seules, représentent une ouverture totale d'environ 0,12 m^2

(1,5 pi²). Voilà la raison pour laquelle il est important de boucher sans exception tous les orifices par lesquels l'air peut passer.

Figure 6. Dans un tunnel de refroidissement par air pulsé, il est indispensable de calfeutrer les interstices par lesquels l'air peut retourner directement au ventilateur.

On doit poser une grosse bâche en plastique ou en toile sur les contenants de produits pour forcer l'air réfrigéré à se frayer un chemin uniformément, dans une seule direction, à travers les produits. Souvent, on pose sur le devant du conduit abritant le ventilateur des bandes de mousse dense ou des rubans à calfeutrer les portes contre lesquels on appuie fermement la première paire de palettes, dans le but de créer une enceinte étanche (figure 3). *On n'insistera jamais assez sur l'importance de vérifier après la construction que l'installation ne présente pas de défauts d'étanchéité.*

Pour les systèmes à palettes, les contenants qui se prêtent idéalement au refroidissement par air pulsé sont ceux qui se plaquent étroitement les uns contre les autres et qui occupent complètement la base de la palette. La figure 7 présente une comparaison entre des contenants à côtés verticaux qui s'emboîtent sur leurs six côtés, dessus et dessous, à la manière des pièces de *LEGO*™, et des contenants à côtés obliques qui ne s'empilent pas étroitement sur le dessus et le dessous. Dans le cas des contenants à côtés obliques, l'air fuit à travers les espaces laissés entre les contenants plutôt que de passer à travers les produits dans les contenants, bien que l'inclinaison des côtés soit très faible (Vigneault et Goyette, 1995). Lorsque les contenants ont des côtés verticaux et qu'ils s'appliquent étroitement les uns contre les autres sur toutes les faces et sur le dessus, l'air n'a pas d'autre choix que de passer à travers le produit, d'où un refroidissement plus rapide et plus uniforme (figure 8). Plus précisément, les contenants idéaux d'une installation de refroidissement par air pulsé sont ceux qui comportent des ouvertures répondant aux conditions suivantes :

- la totalité de leur surface représente 25 % de la surface perpendiculaire à la direction de l'air (Vigneault et Goyette, 1995)
- leur répartition est uniforme;
- elles se font vis-à-vis d'un bout à l'autre de la palette;
- elles sont longues et étroites plutôt que rondes, de façon à ne pas être aussi facilement obstruées par produits;
- elles ne sont pas bouchées par des matériaux d'emballage et de coussinage, par des plateaux, etc.

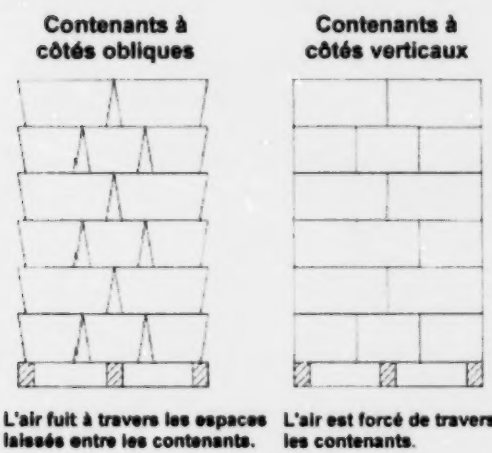

Figure 7. Les contenants doivent s'appliquer étroitement les uns contre les autres, être percés de trous laissant passer l'air uniformément, et occuper complètement la base de la palette dont les dimensions sont d'ordinaire de 1,2 m sur 1,0 m (48 pi sur 40 pi)

Figure 8. Deux tunnels de refroidissement par air pulsé, utilisés côte à côte pour refroidir des choux-fleurs dans le cadre d'un travail de recherche ayant pour objet de comparer des contenants en plastique pliables, à côtés verticaux (à gauche) avec des contenants à côtés obliques, emboîtables (à droite). L'air est porté naturellement à passer par les espaces laissés entre les côtés obliques. Noter la présence des tiges rigides intégrées à la bâche pour l'empêcher d'être aspirée dans le tunnel quand il est en marche.

Un indicateur de pression statique, ou manomètre, qui coûte 50 $ (figure 9), aide à déterminer l'importance des courts-circuits qui se produisent dans l'installation. Le tube à faible pression doit être installé à l'intérieur du tunnel entre les palettes aussi loin que possible du ventilateur (Boyette, 1994) (figure 3). Le tube à haute pression doit être installé dans le passage normal de l'air de la chambre froide. Pour la plupart des applications, la différence doit correspondre à environ 12 mm *(0,5 po)* de colonne d'eau (pression statique). C'est la mesure de la résistance que le ventilateur doit vaincre pour tirer l'air à travers le produit. Quand on obstrue les trous par lesquels l'air prend des raccourcis, la pression statique augmente, ce qui montre que le ventilateur travaille plus fort pour faire passer l'air à travers le produit et donc que l'air réfrigéré passe à l'intérieur des contenants au lieu de les contourner.

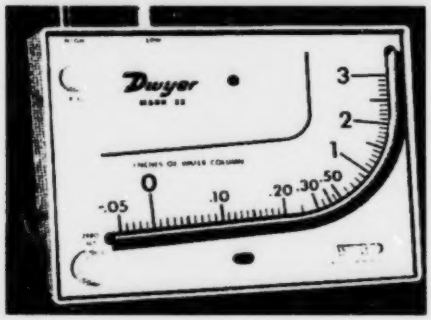

Figure 9. À l'aide d'un manomètre, appareil qui mesure la pression statique, on peut déceler les défauts d'étanchéité du tunnel de refroidissement.

Les moyens les plus usuels employés contre les « courts-circuits » sont les suivants : bandes de mousse ou rubans d'étanchéité glissés entre les palettes et l'installation de refroidissement par air pulsé; carton ondulé ou rubans de plastique entre les palettes et sur les extrémités des palettes ou sur les fentes prévues pour les bras du chariot élévateur (ces matériaux se collent aux ouvertures à cause de la pression de l'air); boudins souples contre lesquels on cale les palettes de façon à empêcher l'air de passer par les fentes.

Groupe frigorifique

Les frigoristes savent depuis longtemps qu'*il n'y a jamais trop de réfrigération* dans une chambre froide. Chose certaine, la règle s'applique aux installations de refroidissement par air pulsé. Étant donné que le refroidissement commence dès que les produits sont placés dans le tunnel et que la courbe du refroidissement fléchit très vite au début (figure 4), la quantité de réfrigération requise au départ est énorme. Elle excède souvent de beaucoup les besoins de la plupart des producteurs et aussi leurs moyens. La formule de la *réfrigération* en kilowatts, kW, *(BTU/h)* nécessaire à tout moment est tirée de la formule du taux de refroidissement *momentané* (Mitchell et coll., 1972) :

Réfrigération nécessaire, en kW *(BTU/h)* = 2,1 x (A-B) x C x D ¸ E

A = Température du produit, en °C *(°F)*

B = Température de l'air de réfrigération, en °C *(°F)*

C = Poids du produit à refroidir, en kg *(lb)*

D = Chaleur spécifique du produit, d'ordinaire environ 3,77 kJ/kg/ °C *(0,9 BTU/lb/ °F)*

E = Durée de refroidissement 7/8 (en heures)

Dans l'exemple précédent, quelle capacité de refroidissement est-elle nécessaire pour refroidir 2 227 kg *(5 000 lb)* de fraises de 28 °C *(82 °F)* à 3,5 °C *(38 °F)* en deux heures, avec de l'air à 0 °C *(32 °F)* (*durée de refroidissement 7/8* de 2 heures)?

En utilisant la formule ci-dessus, les besoins en réfrigération *momentanée* au début du refroidissement (scénario le plus défavorable) seraient de :

2,1 x (28 °C-0 °C) x 2 275 kg x 3,77 kJ/kg/°C ¸ 2 h = 252 150 kJ/h, soit 70 kJ/s ou 70 kW

2,1 x (82 °F-32 °F) x 5 000 lb x 0,9 BTU/lb/°F ¸ 2 h = 236 250 BTU/h

Cela revient à près de 20 tonnes de réfrigération! Les gens du métier utilisent le terme « tonne de réfrigération » pour désigner 3,5 kW *(12 000 BTU/h)*. La plupart des producteurs n'ont pas les moyens de s'équiper en prévision du scénario le plus défavorable. Toutefois, s'ils apprennent à accepter le fait que la température de la pièce s'élève légèrement au début quand ils rentrent le produit dans l'installation, mais qu'elle baisse ensuite graduellement, ils peuvent concevoir des systèmes produisant des niveaux de réfrigération moins élevés. À condition que l'installation soit bien gérée, on conseille de façon empirique de concevoir celle-ci de manière qu'elle puisse fournir environ 2/3 du taux maximal de réfrigération *momentanée* au début de la période de refroidissement;

70 kW x 2/3 = 47 kW

(236 250 BTU/h x 2/3 = 157 500 BTU/h)

Ce qui représente environ 13 tonnes de réfrigération *de plus* que la quantité requise pour compenser les charges de réfrigération (apports de chaleur) venant d'autres zones de la chambre froide, par exemple des portes, des murs et du plafond. La charge de réfrigération venant du produit représente probablement au moins 80 % de la charge totale de la chambre froide.

À moins que le système ne soit conçu à cet effet, il ne faut pas envoyer directement aux serpentins de l'évaporateur, par un conduit, l'air chaud dégagé par le ventilateur de refroidissement à air pulsé; il ne faut pas non plus envoyer directement l'air refroidi par les serpentins de l'évaporateur vers les palettes mises à refroidir par air froid pulsé. Dans la plupart des cas, les serpentins et les ventilateurs n'ont pas été conçus pour cette application. Quand on utilise une installation de refroidissement par air pulsé dans une chambre froide où sont entreposés des produits déjà refroidis, on doit diriger l'air chaud du ventilateur en direction opposée aux produits et vers les serpentins de l'évaporateur.

À l'intérieur de la chambre froide à air pulsé, l'humidité relative de l'air de refroidissement doit être supérieure à 85 % pour réduire le risque de flétrissement du produit. Il faut donc prévoir une grande surface de serpentins d'évaporation et s'attendre à de légères baisses de température par endroits sur les serpentins. Si on maintient la chambre froide à 0 °C *(32 °F)* et que les serpentins de l'évaporateur sont trop petits, la température de l'air refroidi à leur contact sera de plusieurs degrés inférieure à 0 °C *(32 °F)*. Il en résulte un assèchement de l'air et une humidité relative trop faible dans la chambre froide pour des fruits et des légumes frais. Les produits risquent d'être endommagés par le froid si cet air ne se réchauffe pas légèrement dans la chambre avant d'être aspiré à travers les produits par l'installation de refroidissement par air pulsé.

Il est important de maintenir l'air de refroidissement à une température aussi voisine que possible de la température recherchée, surtout vers la fin de la période de refroidissement. Si l'air s'élève de quelques degrés, le refroidissement du produit risque de cesser et un réchauffement peut même se produire. On comprend donc la nécessité d'avoir des chambres froides séparées pour l'air pulsé, avec une grande capacité de réfrigération.

Certains groupes frigorifiques, tel le *Filacell System*, ont été expressément conçus pour refroidir par air pulsé. C'est un groupe qui comporte des ventilateurs de grande capacité capables de fonctionner avec des pressions statiques élevées, tout en fournissant une humidité très élevée. On peut consulter un frigoriste pour connaître les options disponibles.

Instruments de contrôle

Les instruments de contrôle aident à mieux gérer l'installation de refroidissement par air pulsé. En effet, la connaissance de certaines données est capitale :

- la température initiale du produit;
- la température visée à la fin du refroidissement;
- la durée maximale pendant laquelle le produit peut être refroidi par air pulsé

Tous ces facteurs revêtent une importance particulière pour les producteurs qui se servent d'une installation de refroidissement par air pulsé pour la première fois.

Il faut mesurer la température interne de quelques produits dans une palette avant de placer celle-ci dans l'installation de refroidissement. Pour cela, on enfonce au centre du produit une sonde thermique conçue à cet effet qui donne une lecture numérique instantanée. Voir la figure 10. La température du produit peut différer de celle de l'air ambiant. Ainsi, les produits de gros calibre comme les melons brodés ou les choux mettent plus de temps à se réchauffer (ou à refroidir) que les produits de petite taille comme les prunes, même après une élévation (ou une baisse) brusque de la température de l'air ambiant. Par exemple, la température de l'air extérieur au milieu de la matinée peut être supérieure à la température des pêches qui sont encore sur l'arbre parce qu'elles sont encore fraîches de la nuit, ou à cause de l'ombre du feuillage. À l'inverse, la température des fraises peut être plus élevée que celle de l'air lorsqu'elles sont au soleil du fait de leur couleur sombre. En outre, les produits qui se trouvent sur le dessus d'un bac, d'un panier ou d'un cageot peuvent être plus chauds que les produits situés plus bas à cause de l'ensoleillement direct, ou de la chaleur émanant d'un contenant de couleur sombre très chaud.

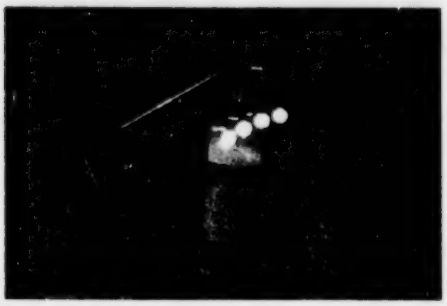

Figure 10. Une sonde de température manuelle, portative, à lecture numérique, est l'outil indispensable pour déterminer la température des fruits et des légumes à leur arrivée dans l'installation et à la fin du refroidissement.

La plupart des producteurs savent à quelle température ils veulent que leurs produits soient entreposés. Malheureusement, quand la récolte bat son plein, les fruits et les légumes ne peuvent pas toujours rester dans le tunnel de refroidissement aussi longtemps qu'il le faudrait. Quoi qu'il en soit, les producteurs qui connaissent la température initiale des produits peuvent se faire une meilleure idée de la température que le produit atteindra au bout d'un certain temps passé dans l'installation de refroidissement.

Le contrôle de la température du produit en cours de refroidissement est une opération difficile qui demande du temps. Cependant, une des façons d'estimer la température réelle des fruits et des légumes à un moment donné est de contrôler la température de l'air réchauffé rejeté par le ventilateur et de la comparer avec celle de l'air de refroidissement dans la chambre froidie au moment où il pénètre dans la palette. La température de l'air rejeté correspond normalement à la moitié de l'écart entre la température de l'air de refroidissement entrant dans la palette et celle du produit à ce moment-là.

Si la température de l'air de refroidissement pénétrant dans la palette est de 2 °C et que celle de l'air rejeté par le ventilateur est de 10 °C, la température du produit sera en principe d'environ 18 °C, puisque 10 °C est à mi-chemin entre 2 °C et 18 °C. Les produits qui sont les premiers sur le trajet de l'air froid se refroidissent plus rapidement que les produits situés plus loin, parce que l'air se sera réchauffé. Si un bon pourcentage de l'air prend des raccourcis, cette méthode de contrôle n'est pas fiable : en effet, la quantité d'air froid qui revient directement au ventilateur étant plus élevée, la température de l'air rejeté s'abaisse et donne au superviseur la fausse impression que le refroidissement progresse comme il se doit.

On peut placer un thermostat au niveau de l'air qui est rejeté par le ventilateur du système de refroidissement par air pulsé de manière à pouvoir arrêter le fonctionnement de cet appareil quand le flot d'air atteint une certaine température ou de le ralentir s'il est à vitesse variable. Cela peut contribuer à réduire le risque que l'appareil reste en fonctionnement plus longtemps que nécessaire, à économiser l'électricité et à empêcher un apport inutile de chaleur dégagée par les moteurs dans la chambre froide. On peut le cas échéant installer une minuterie sur le ventilateur qui en déclenchera l'arrêt au bout d'un certain temps.

| Haut de la page |

Les 10 étapes du calcul des paramètres d'une installation de refroidissement par air pulsé

1. Déterminer la production d'une journée moyenne, en kg *(lb)*;

2. Déterminer la production d'une grosse journée, en kg *(lb)*;

3. Déterminer la durée de refroidissement disponible (heures/jour);

4. Calculer le nombre de lots de produit à refroidir (lots/jour);

5. Calculer la taille d'un lot, en kg/lot *(lb/lot)*;

6. Sélectionner un débit d'air, en L/s/kg *(PCM/lb)*;

7. Calculer le débit du ventilateur, en L/s *(PCM)*;

8. Calculer la réfrigération de pointe, en kW *(BTU/h)*;

9. Appliquer la *règle de la réfrigération aux 2/3*, en kW *(BTU/h)*;

10. Déterminer la largeur du tunnel et l'espace libre entre le tunnel et le mur, en m *(pi)*.

| Haut de la page |

Étude de cas

Un producteur exploite une fraisière de 4 ha *(10 acres)* et récolte 3 000 cageots de fraises à l'hectare *(1 200 cageots/acre)* à raison de 6 kg/cageot *(13,2 lb/cageot)* au cours d'une saison de récolte qui dure 25 jours. Les palettes contiennent 64 cageots, mesurent 1,5 m de haut *(5 pi)*, et pèsent 384 kg *(845 lb)*. La cueillette s'échelonne de 6 h du matin à midi, et les fraises cueillies ont une température moyenne de 25 °C *(77 °F)*. La chambre froide est à 0 °C *(32 °F)*. Déterminer la taille du ventilateur, la réfrigération supplémentaire nécessaire et la largeur du tunnel et des espaces libres.

1. Déterminer la production d'une journée moyenne, en kg (lb)

4 ha x 3 000 cageots/ha x 6 kg/cageot ÷ 25 j = 2880 kg/j

10 acres x 1 200 cageots/acre x 13,2 lb/cageot ÷ 25 j = 6340 lb/j

2. Déterminer la production d'une grosse journée, en kg (lb)

En période de pointe, la production d'une seule journée pourra théoriquement s'élever jusqu'à 10 000 kg de fruits cueillis (22 000 lb). Il serait irréaliste de concevoir l'installation en fonction de la journée de cueillette la plus intense de la saison, mais la règle empirique veut qu'on la conçoive en fonction d'une *grosse journée typique*, qui est souvent le *double de la journée moyenne.* Par conséquent :

2 880 kg/journée moyenne x 2 = 5 760 kg/grosse journée typique

(6 340 lb/journée moyenne x 2 = 12 680 lb/grosse journée typique)

3. Déterminer la durée de refroidissement disponible (heures/jour)

La cueillette s'échelonne de 6 heures du matin à midi, soit pendant 6 heures. Les premières fraises rentrent donc dans le tunnel de refroidissement vers 7 heures et les fraises rentrent ensuite continuellement jusqu'à 12 h. Comme le tunnel peut continuer à fonctionner aussi longtemps qu'il le faut après 12 h, on peut estimer que la durée de refroidissement disponible est de *6 heures*, allant de 7 h du matin à 1 h de l'après-midi. Les dernières fraises qui sont cueillies sont généralement les plus chaudes et peuvent donc rester plus longtemps dans le tunnel de refroidissement par air pulsé, s'il le faut.

4. Calculer le nombre de lots à refroidir (lots/jour)

Selon les données du tableau 2, il est raisonnable de viser une *durée de refroidissement 7/8* de 1 heure et demie (1,5 h) pour les fraises :

6 heures disponibles/jour ÷ 1,5 h/lot = 4 lots/jour

5. Calculer la taille du lot, en kg/lot (lb/lot)

5 760 kg/jour ÷ 4 lots/jour = 1 440 kg/lot

(12 680 lb/jour ÷ 4 lots/jour = 3 170 lb/lot)

Cela représente 240 cageots/lot, soit 4 palettes.

6. Sélectionner un débit d'air, en L/s/kg (PCM/lb)

Selon les données du tableau 2, une *durée de refroidissement 7/8* de 1 heure et demie demande approximativement un débit de 2,0 L/s/kg de produits *(2 PCM/lb)*. Plus le débit est élevé, plus le refroidissement voulu s'obtiendra rapidement, et inversement. Prévoir la *durée de refroidissement 7/8* n'est pas chose facile, car elle dépend de plusieurs variables.

7. Calculer le débit du ventilateur, en L/s (PCM)

2,0 L/s/kg x 1 440 kg/lot = 2 880 L/s (2,88 m^3/s)

(2,0 PCM/lb x 3 170 lb/lot = 6 340 PCM)

D'après les données du tableau 3, un ventilateur centrifuge ayant un moteur de 2,25 kW *(3 hp)* devrait suffire. Dans le cas contraire, on peut demander à son fournisseur de trouver un ventilateur qui délivre au moins 2 880 L/s à la pression statique de 25 mm *(6 340 PCM à la pression statique d'1 pouce)*.

8. Calculer la réfrigération de pointe, en kW (BTU/h)

2,1 x (25 °C-0 °C) x 1 440 kg x 3,77 kJ/kg/°C ÷ 1,5 h

= 190 000 kJ/h, soit 53 kJ/s, soit 53 kW, soit 15 tonnes

2,1 x (77 °F-32 °F) x 3 170 lb x 0,9 BTU/lb/°F ÷ 1,5 h

= 179 750 BTU/h, soit 15 tonnes de réfrigération

Cette quantité sert à refroidir les fraises, pas le local!

9. Appliquer la règle de la réfrigération aux 2/3, en watts (BTU/h)

Fournir 15 tonnes de réfrigération, c'est beaucoup demander à un tunnel de refroidissement par air pulsé formé de 4 palettes de fraises. Par conséquent :

53 kW (théorie) x 2/3 = 35 kW (pratique); 10 tonnes

179 750 BTU/h x 2/3 = 119 800 BTU/h; 10 tonnes

10. *Déterminer la largeur du tunnel et l'espace libre entre le tunnel et le mur, en m (pi)*

2,88 $m^3/s \div 5$ m/s vitesse maximale de l'air = 0,58 m^2 de surface minimale

6 340 PCM ÷ 1000 pi/min max. = 6,34 pi^2 de surface minimale

Lorsque les palettes mesurent 1,5 m *(5 pi)* de hauteur, le tunnel doit avoir une largeur minimale de 0,58 $m^2 \div 1,5$ m = 0,4 m; toutefois, dans la pratique le minimum est de 0,6 m *(2 pi)*. L'espace entre le tunnel et le mur doit aussi être au minimum de 0,3 m *(1 pi)* pour permettre à un employé de s'y glisser.

| Haut de la page |

Autres considérations

- La bâche posée sur le tunnel doit recouvrir les palettes sur toute leur largeur autant que possible et, à l'autre bout, redescendre jusqu'au sol pour éviter que l'air n'emprunte trop de raccourcis pour retourner au ventilateur.
- Des tiges rigides doivent être fixées à la bâche pour l'empêcher d'être aspirée à l'intérieur du tunnel.
- On détecte les défauts d'étanchéité à l'aide d'une feuille de cellophane. Celle-ci est aspirée vers les trous qui n'ont pas été calfeutrés.
- Le ventilateur doit être centré dans le conduit de façon à aspirer l'air aussi uniformément que possible dans le tunnel.
- De grosses quantités de fruits ou de légumes cueillis tôt le matin représentent la même charge thermique que des quantités moins importantes cueillies plus tard le même jour.
- Au champ, les contenants vides et le produit récolté doivent être placés sous des tentes ou des auvents pour réduire au minimum la chaleur de récolte.
- À mesure que le temps se fait plus chaud dans la journée, réduire le laps de temps pendant lequel le produit cueilli attend au champ avant d'être mis à refroidir.

| Haut de la page |

Références bibliographiques

Boyette, M.D., L.G.Wilson, E.A.Estes. 1994. *Forced-air cooling, maintaining the quality of North Carolina fresh produce*. North Carolina Cooperative Extension Service. Juillet.

Mitchell, F.G., R. Guillou, R.A. Parsons. 1972. *Commercial cooling of fruits and vegetables*. Manuel 43. University of California. p.33.

Thompson, J.F. 1996. *Forced-air cooling. Perishable handling newsletter.* Numéro 88. Novembre. p. 2-11.

Vigneault, C., B.Goyette. 1995. *Contenants réutilisables pour la manutention des fruits et légumes frais : Effet de la forme du contenant, la largeur et le pourcentage d'ouvertures lors du prérefroidissement à l'air forcé.* Rapport Confidentiel. Centre de recherche et de développement en horticulture. Agriculture et Agro-Alimentaire Canada. Saint-Jean-sur-Richelieu. 13 p.

Nous remercions le Secrétariat d'État pour sa contribution financière à la réalisation de la présente fiche technique.

Hugh Fraser, P. Eng., est un ingénieur agronome spécialiste des structures et du matériel de production horticole, travaillant à la Division de l'Agriculture et des Affaires rurales du MAAARO, à Vineland.

Ont participé à la révision de la présente fiche technique :

Bert Van Dalfsen, P. Eng., ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation de la Colombie-Britannique
Dennis Darby, P. Eng., ministère de l'Agriculture de l'Alberta
Don Allen, P. Eng., Allen Engineering Services, Nouvelle-Écosse
Florent Mercier, P. Eng. Université Laval, Québec
Clément Vigneault, Ph.D., P. Eng, Agriculture et Agroalimentaire Canada

| Haut de la page |

| Page d'accueil du génie |

| Site principal | Commentaires | Recherche | Plan du site | English |
| Page d'accueil | Nouveautés | Calendrier | Produits | Communiqués |

Ontario
Ce site est mis à jour par le gouvernement de l'Ontario, Canada.

Les renseignements de ce site sont fournis à titre de service au public. On ne peut garantir que l'information est à jour ou exacte. Les lecteurs devront vérifier l'information avant de s'en servir.

Vos commentaires et questions techniques à: engineering@omafra.gov.on.ca
©Imprimeur de la Reine pour l'Ontario, 2001

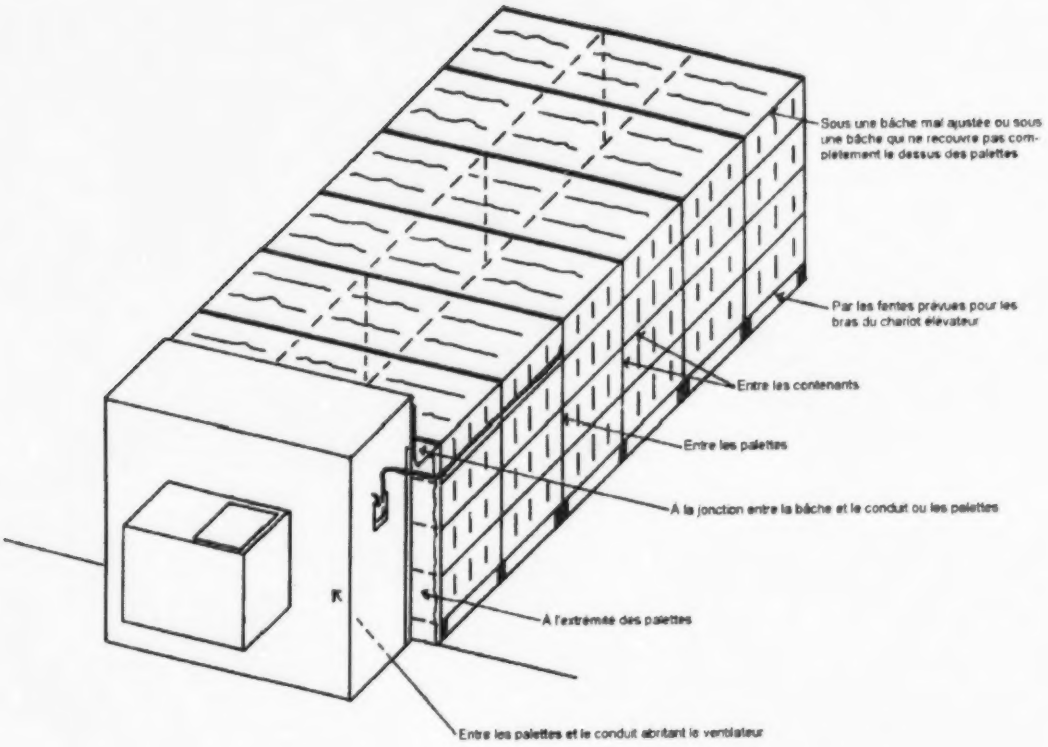
Sous une bâche mal ajustée ou sous une bâche qui ne recouvre pas complètement le dessus des palettes
Par les fentes prévues pour les bras du chariot élévateur
Entre les contenants
Entre les palettes
À la jonction entre la bâche et le conduit ou les palettes
À l'extrémité des palettes
Entre les palettes et le conduit abritant le ventilateur

Figure #6